

THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.

CONDUCTED BY

LORD KELVIN, G.C.V.O. D.C.L. LL.D. F.R.S. &c.

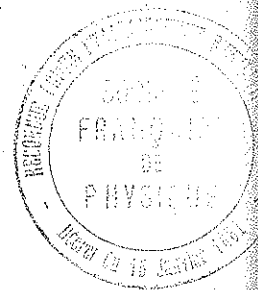
JOHN JOLY, M.A. D.Sc. F.R.S. F.G.S.

AND

WILLIAM FRANCIS, PH.D. F.L.S. F.R.A.S. F.C.S.

"Nec hrancarum sane textus ideo melior quia ex se fila gignunt, nec noster
villior quia ex alienis libamus ut apes." JUST. LIPS. *Polit. lib. i. cap. 1.* Not.

VOL. V.—SIXTH SERIES.
JANUARY—JUNE 1903.

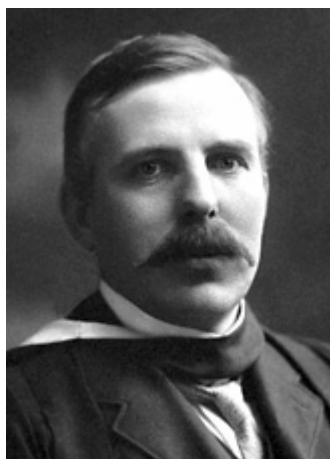


LONDON:

TAYLOR AND FRANCIS, RED LION COURT, FLEET STREET.

SOLE AGENTS: HENRY J. BIRCH, MARSHALL, HAMILTON, KENT, AND CO., LD.—T. AND T. CLARK,
EDINBURGH;—SMITH AND SON, GLASGOW;—HODGES, FIGGIS, AND
CO., DUBLIN;—PUTNAM, NEW YORK;—YEUVE J. BOYVEAU,
PARIS;—AND ASHER AND CO., BERLIN.

Information du lecteur



Le document proposé ci-après se compose de deux parties :

1) le texte (en anglais) de Rutherford et Soddy, « Radioactive change », *Phil. Mag. and Journ. of Sc.*, V (Jan-Jun 1903), p. 576-591.

2) la traduction de la majeure partie de ce texte, telle que publiée dans P. Radvanyi, *Histoire de l'atome. De l'intuition à la réalité*, Belin 2007. Traduction française Virginie Emsellem (reproduite avec l'aimable autorisation des éditions Belin).

A stylized, handwritten signature of Ernest Rutherford in black ink.

practically all of the emanation comes off very suddenly at a temperature not much more than one degree above that at which only 2 per cent. has volatilized. The general indication of all the experiments, considered together, is to show that the condensed emanation possesses a true vapour-pressure, and that the emanation commences to volatilize slowly two or three degrees below the temperature of rapid volatilization even when the process occurs in a stationary atmosphere. The emanations therefore possess the usual properties possessed by ordinary gaseous matter, in so far as the phenomena of volatilization and condensation are concerned. It was shown in a recent paper that they also possess the property possessed by gases of being occluded by solids under certain conditions. These new properties, taken in conjunction with the earlier discovered diffusion phenomena, characteristic of the radioactive emanations, leave no doubt that the latter must consist of matter in the gaseous state.

McGill University, Montreal,
March 9, 1903.

LX. *Radioactive Change.* By E. RUTHERFORD, M.A., D.Sc.,
Macdonald Professor of Physics, McGill University, and
F. SODDY, M.A. (Oxon.).

CONTENTS.

- I. The Products of Radioactive Change, and their Specific Material Nature.
- II. The Synchronism between the Change and the Radiation.
- III. The Material Nature of the Radiations.
- IV. The Law of Radioactive Change.
- V. The Conservation of Radioactivity.
- VI. The Relation of Radioactive Change to Chemical Change.
- VII. The Energy of Radioactive Change and the Internal Energy of the Chemical Atom.

§ 1. *The Products of Radioactive Change and their Specific Material Nature.*

IN previous papers it has been shown that the radioactivity of the elements radium, thorium, and uranium is maintained by the continuous production of new kinds of matter which possess temporary activity. In some cases the new product exhibits well-defined chemical differences from the element producing it, and can be separated by chemical processes. Examples of this are to be found in the removal of thorium X from thorium and uranium X from uranium. In other cases the new products are gaseous in character, and

* Communicated by the Authors.

so separate themselves by the mere process of diffusion, giving rise to the radioactive emanations which are produced by compounds of thorium and radium. These emanations can be condensed by cold and again volatilized; although they do not appear to possess positive chemical affinities, they are frequently occluded by the substances producing them when in the solid state, and are liberated by solution; they diffuse rapidly into the atmosphere and through porous partitions, and in general exhibit the behaviour of inert gases of fairly high molecular weight. In other cases again the new matter is itself non-volatile, but is produced by the further change of the gaseous emanation; so that the latter acts as the intermediary in the process of its separation from the radioactive element. This is the case with the two different kinds of excited activity produced on objects in the neighbourhood of compounds of thorium and radium respectively, which in turn possess well-defined and characteristic material properties. For example, the thorium excited activity is volatilized at a definite high temperature, and redeposited in the neighbourhood, and can be dissolved in some reagents and not in others.

These various new bodies differ from ordinary matter, therefore, only in one point, namely, that their quantity is far below the limit that can be reached by the ordinary methods of chemical and spectroscopic analysis. As an example that this is no argument against their specific material existence, it may be mentioned that the same is true of radium itself as it occurs in nature. No chemical or spectroscopic test is sufficiently delicate to detect radium in pitchblende, and it is not until the quantity present is increased many times by concentration that the characteristic spectrum begins to make its appearance. Mme. Curie and also Giesel have succeeded in obtaining quite considerable quantities of pure radium compounds by working up many tons of pitchblende, and the results go to show that radium is in reality one of the best defined and most characteristic of the chemical elements. So, also, the various new bodies, whose existence has been discovered by the aid of their radioactivity, would no doubt, like radium, be brought within the range of the older methods of investigation if it were possible to increase the quantity of material employed indefinitely.

§ 2. *The Synchronism between the Change and the Radiation.*

In the present paper the nature of the changes in which these new bodies are produced remains to be considered. The experimental evidence that has been accumulated is now

sufficiently complete to enable a general theory of the nature of the process to be established with a considerable degree of certainty and definiteness. It soon became apparent from this evidence that a much more intimate connexion exists between the radioactivity and the changes that maintain it than is expressed in the idea of the production of active matter. It will be recalled that all cases of radioactive change that have been studied can be resolved into the production by one substance of one other (disregarding for the present the expelled rays). When several changes occur together these are not simultaneous but successive. Thus thorium produces thorium X, the thorium X produces the thorium emanation, and the latter produces the excited activity. Now the radioactivity of each of these substances can be shown to be connected, not with the change in which it was itself produced, but with the change in which it in turn produces the next new type. Thus after thorium X has been separated from the thorium producing it, the radiations of the thorium X are proportional to the amount of emanation that it produces, and both the radioactivity and the emanating power of thorium X decay according to the same law *and at the same rate*. In the next stage the emanation goes on to produce the excited activity. The activity of the emanation falls to half-value in one minute, and the amount of excited activity produced by it on the negative electrode in an electric field falls off in like ratio. These results are fully borne out in the case of radium. The activity of the radium emanation decays to half-value in four days, and so also does its power of producing the excited activity.

Hence it is not possible to regard radioactivity as a *consequence* of changes that have already taken place. The rays emitted must be an *accompaniment* of the change of the radiating system into the one next produced.

Non-separable activity.—This point of view at once accounts for the existence of a constant radioactivity, non-separable by chemical processes, in each of the three radio-elements. This non-separable activity consists of the radiations that accompany the primary change of the radio-element itself into the first new product that is produced. Thus in thorium about 25 per cent. of the α radiation accompanies the first change of the thorium into thorium X. In uranium the whole of the α radiation is non-separable and accompanies the change of the uranium into uranium X.

Several important consequences follow from the conclusion that the radiations accompany the change. A body that is radioactive must *ipso facto* be changing, and hence it is not

possible that any of the new types of radioactive matter—*e. g.*, uranium X, thorium X, the two emanations, &c.—can be identical with any of the known elements. For they remain in existence only a short time, and the decay of their radioactivity is the expression of their continuously diminishing quantity. On the other hand, since the ultimate products of the changes cannot be radioactive, there must always exist at least one stage in the process beyond the range of the methods of experiment. For this reason the ultimate products that result from the changes remain unknown, the quantities involved being unrecognizable, except by the methods of radioactivity. In the naturally occurring minerals containing the radio-elements these changes must have been proceeding steadily over very long periods, and, unless they succeed in escaping, the ultimate products should have accumulated in sufficient quantity to be detected, and therefore should appear in nature as the invariable companions of the radio-elements. We have already suggested on these and other grounds that possibly helium may be such an ultimate product, although, of course, the suggestion is at present a purely speculative one. But a closer study of the radioactive minerals would in all probability afford further evidence on this important question.

§ 3. *The Material Nature of the Radiations.*

The view that the ray or rays from any system are produced at the moment the system changes has received strong confirmation by the discovery of the electric and magnetic deviability of the α ray. The deviation is in the opposite sense to the β or cathode-ray, and the rays thus consist of positively charged bodies projected with great velocity (Rutherford, Phil. Mag., Feb. 1903). The latter was shown to be of the order of $2.5 \cdot 10^9$ cms. per second. The value of e/m , the ratio of the charge of the carrier to its mass, is of the order $6 \cdot 10^3$. Now the value of e/m for the cathode-ray is about 10^7 . Assuming that the value of the charge is the same in each case, the apparent mass of the positive projected particle is over 1000 times as great as for the cathode-ray. Now $e/m = 10^4$ for the hydrogen atom in the electrolysis of water. The particle that constitutes the α ray thus behaves as if its mass were of the same order as that of the hydrogen atom. The α rays from all the radio-elements, and from the various radioactive bodies which they produce, possess analogous properties, and differ only to a slight extent in penetrating power. There are thus strong reasons

for the belief that the α rays generally are projections and that the mass of the particle is of the same order as that of the hydrogen atom, and very large compared with the mass of the projected particle which constitutes the β or easily deviable ray from the same element.

With regard to the part played in radioactivity by the two types of radiation, there can be no doubt that the α rays are by far the more important. In all cases they represent over 99 per cent. of the energy radiated*, and although the β rays on account of their penetrating power and marked photographic action have been more often studied, they are comparatively of much less significance.

It has been shown that the non-separable activity of all three radio-elements, the activity of the two emanations, and the first stage of the excited activity of radium, comprise only α rays. It is not until the processes near completion in so far as their progress can be experimentally traced that the β or cathode-ray makes its appearance†.

In light of this evidence there is every reason to suppose, not merely that the expulsion of a charged particle accompanies the change, but that this expulsion actually is the change.

§ 4. The Law of Radioactive Change.

The view that the radiation from an active substance accompanies the change gives a very definite physical meaning to the law of decay of radioactivity. In all cases where one of the radioactive products has been separated, and its activity examined independently of the active substance which gives rise to it, or which it in turn produces, it has been found that the activity under all conditions investigated falls off in a geometrical progression with the time. This is expressed by the equation

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-\lambda t}$$

where I_0 is the initial ionization current due to the radiations, I_t that after the time t , and λ is a constant. Each ray or

* In the paper in which this is deduced (Phil. Mag. Sept. 1902, p. 329) there is an obvious slip of calculation. The number should be 100 instead of 1000.

† In addition to the α and β rays the radio-elements also give out a third type of radiation which is extremely penetrating. Thorium as well as radium (Rutherford, *Phys. Zeit.* 1902) gives out these penetrating rays, and it has since been found that uranium possesses the same property. These rays have not yet been sufficiently examined to make any discussion possible of the part they play in radioactive processes.

projected particle will in general produce a certain definite number of ions in its path, and the ionization current is therefore proportional to the number of such particles projected per second. Thus

$$\frac{n_t}{n_0} = e^{-\lambda t},$$

where n_t is the number projected in unit of time for the time t and n_0 the number initially.

If each changing system gives rise to one ray, the number of systems N_t which remain unchanged at the time t is given by

$$N_t = \int_t^\infty n_t \cdot dt = \frac{n_0}{\lambda} e^{-\lambda t}.$$

The number N_0 initially present is given by putting $t=0$.

$$N_0 = \frac{n_0}{\lambda}$$

and

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}.$$

The same law holds if each changing system produces two or any definite number of rays.

Differentiating

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_t,$$

or, the rate of change of the system at any time is always proportional to the amount remaining unchanged.

The law of radioactive change may therefore be expressed in the one statement—the proportional amount of radioactive matter that changes in unit time is a constant. When the total amount does not vary (a condition nearly fulfilled at the equilibrium point where the rate of supply is equal to the rate of change) the proportion of the whole which changes in unit time is represented by the constant λ , which possesses for each type of active matter a fixed and characteristic value. λ may therefore be suitably called the “radioactive constant.” The complexity of the phenomena of radioactivity is due to the existence as a general rule of several different types of matter changing at the same time into one another, each type possessing a different radioactive constant.

§ 5. The Conservation of Radioactivity.

The law of radioactive change that has been deduced holds for each stage that has been examined, and therefore holds

for the phenomenon generally. The radioactive constant λ has been investigated under very widely varied conditions of temperature, and under the influence of the most powerful chemical and physical agencies, and no alteration of its value has been observed. The law forms in fact the mathematical expression of a general principle to which we have been led as the result of our investigations as a whole. Radioactivity, according to present knowledge, must be regarded as the result of a process which lies wholly outside the sphere of known controllable forces, and cannot be created, altered, or destroyed. Like gravitation, it is proportional only to the quantity of matter involved, and in this restricted sense it is therefore true to speak of the principle as the conservation of radioactivity*. Radioactivity differs of course from gravitation in being a special and not necessarily a universal property of matter, which is possessed by different kinds in widely different degree. In the processes of radioactivity these different kinds change into one another and into inactive matter, producing corresponding changes in the radioactivity. Thus the decay of radioactivity is to be ascribed to the disappearance of the active matter, and the recovery of radioactivity to its production. When the two processes balance—a condition very nearly fulfilled in the case of the radio-elements in a closed space—the activity remains constant. But here the apparent constancy is merely the expression of the slow rate of change of the radio-element itself. Over sufficiently long periods its radioactivity must also decay according to the law of radioactive change, for otherwise it would be necessary to look upon radioactive change as involving the creation of matter. In the universe therefore the total radioactivity must, according to our present knowledge, be growing less and tending to disappear.

* Apart from the considerations that follow, this nomenclature is a convenient expression of the observed facts that the total radioactivity (measured by the radiations peculiar to the radio-elements) is for any given mass of radio-element a constant under all conditions investigated. The radioactive equilibrium may be disturbed and the activity distributed among one or more active products capable of separation from the original element. But the sum total throughout these operations is at all times the same.

For practical purposes the expression "conservation," applied to the radioactivity of the three radio-elements, is justified by the extremely minute proportion that can change in any interval over which it is possible to extend actual observations. But *rigidly* the term "conservation" applies only with reference to the radioactivity of any definite quantity of radioactive matter, whereas in nature this quantity must be changing spontaneously and continually growing less. To avoid possible misunderstanding, therefore, it is necessary to use the expression only in this restricted sense.

Hence the energy liberated in radioactive processes does not disobey the law of the conservation of energy.

It is not implied in this view that radioactivity, considered with reference to the quantity of matter involved, is conserved under all conceivable conditions, or that it will not ultimately be found possible to control the processes that give rise to it. The principle enunciated applies of course only to our present state of experimental knowledge, which is satisfactorily interpreted by its aid.

The general evidence on which the principle is based embraces the whole field of radioactivity. The experiments of Becquerel and Curie have shown that the radiations from uranium and radium respectively remain constant over long intervals of time. Mme. Curie put forward the view that radioactivity was a specific property of the element in question, and the successful separation of the element radium from pitchblende was a direct result of this method of regarding the property. The possibility of separating from a radio-element an intensely active constituent, although at first sight contradictory, has afforded under closer examination nothing but confirmation of this view. In all cases only a part of the activity is removed, and this part is recovered spontaneously by the radio-element in the course of time. Mme. Curie's original position, that radioactivity is a specific property of the element, must be considered to be beyond question. Even if it should ultimately be found that uranium and thorium are admixtures of these elements with a small *constant* proportion of new radio-elements with correspondingly intense activity, the general method of regarding the subject is quite unaffected.

In the next place, throughout the course of our investigations we have not observed a single instance in which radioactivity has been created in an element not radioactive, or destroyed or altered in one that is, and there is no case at present on record in which such a creation or destruction can be considered as established. It will be shown later that radioactive change can only be of the nature of an atomic disintegration, and hence this result is to be expected, from the universal experience of chemistry in failing to transform the elements. For the same reason it is not to be expected that the rate of radioactive change would be affected by known physical or chemical influences. Lastly, the principle of the conservation of radioactivity is in agreement with the energy relations of radioactive change. These will be considered more fully in § 7, where it is shown that the energy changes involved are of a much higher order of magnitude than is the case in molecular change.

It is necessary to consider briefly some of the apparent exceptions to this principle of the conservation of radioactivity. In the first place it will be recalled that the emanating power of the various compounds of thorium and radium respectively differ widely among themselves, and are greatly influenced by alterations of physical state. It was recently proved (Phil. Mag. April 1903, p. 453) that these variations are caused by alterations in the rate at which the emanations escape into the surrounding atmosphere. The emanation is produced at the same rate both in de-emanated and in highly emanating thorium and radium compounds, but is in the former stored up or occluded in the compound. By comparing the amount stored up with the amount produced per second by the same compound dissolved, it was found possible to put the matter to a very sharp experimental test which completely established the law of the conservation of radioactivity in these cases. Another exception is the apparent destruction of the thorium excited activity deposited on a platinum wire by ignition to a white heat. This has recently been examined in this laboratory by Miss Gates, and it was found that the excited activity is not destroyed, but is volatilized at a definite temperature and redeposited in unchanged amount on the neighbouring surfaces.

Radioactive "Induction."—Various workers in this subject have explained the results they have obtained on the idea of radioactive "induction," in which a radioactive substance has been attributed the power of inducing activity in bodies mixed with it, or in its neighbourhood, which are not otherwise radioactive. This theory was put forward by Becquerel to explain the fact that certain precipitates (notably barium sulphate) formed in solutions of radioactive salts are themselves radioactive. The explanation has been of great utility in accounting for the numerous examples of the presence of radioactivity in non-active elements, without the necessity of assuming in each case the existence of a new radio-element therein, but our own results do not allow us to accept it.

In the great majority of instances that have been recorded the results seem to be due simply to the *mixture of active matter with the inactive element*. In some cases the effect is due to the presence of a small quantity of the original radio-element, in which case the "induced" activity is permanent. In other cases, one of the disintegration products, like uranium X or thorium X, has been dragged down by the precipitate, producing temporary, or, as it is sometimes termed, "false" activity. In neither case is the original character of the radiation at all affected. It is probable that a re-examination

of some of the effects that have been attributed to radioactive induction would lead to new disintegration products of the known radio-elements being recognized.

Other Results.—A number of cases remain for consideration, where, by working with very large quantities of material, there have been separated from minerals possible new radio-elements, *i. e.* substances possessing apparently permanent radioactivity with chemical properties different from those of the three known radio-elements. In most of these cases, unfortunately, the real criteria that are of value, *viz.*, the nature of the radiations and the presence or absence of distinctive emanations, have not been investigated. The chemical properties are of less service, for even if a new element were present, it is not at all necessary that it should be in sufficient quantity to be detected by chemical or spectroscopic analysis. Thus the radio-lead described by Hoffmann and Strauss and by Giesel cannot be regarded as a new element until it is shown that it has permanent activity of a distinctive character.

In this connexion the question whether polonium (radio-bismuth) is a new element is of great interest. The polonium discovered by Mme. Curie is not a permanent radioactive substance, its activity decaying slowly with the time. On the view put forward in these papers, polonium must be regarded as a disintegration product of one of the radio-elements present in pitchblende. Recently, however, Marckwald (*Ber. der D. Chem. Gesel.* 1902, pp. 2285 & 4239), by the electrolysis of pitchblende solutions, has obtained an intensely radioactive substance very analogous to the polonium of Curie. But he states that the activity of his preparation does not decay with time, and this, if confirmed, is sufficient to warrant the conclusion that he is not dealing with the same substance as Mme. Curie. On the other hand, both preparations give only α rays, and in this they are quite distinct from the other radio-elements. Marckwald has succeeded in separating his substance from bismuth, thus showing it to possess different chemical properties; and in his latest paper states that the bismuth-free product is indistinguishable chemically from tellurium. If the permanence of the radioactivity is established, the existence of a new radio-element must be inferred.

If elements heavier than uranium exist it is probable that they will be radioactive. The extreme delicacy of radioactivity as a means of chemical analysis would enable such elements to be recognized even if present in infinitesimal quantity. It is therefore to be expected that the number of

radio-elements will be augmented in the future, and that considerably more than the three at present recognized exist in minute quantity. In the first stage of the search for such elements a purely chemical examination is of little service. The main criteria are the permanence of the radiations, their distinctive character, and the existence or absence of distinctive emanations or other disintegration products.

§ 6. *The Relation of Radioactive Change to Chemical Change.*

The law of radioactive change, that the rate of change is proportional to the quantity of changing substance, is also the law of monomolecular chemical reaction. Radioactive change, therefore, must be of such a kind as to involve one system only, for if it were anything of the nature of a combination, where the mutual action of two systems was involved, the rate of change would be dependent on the concentration, and the law would involve a volume-factor. This is not the case. Since radioactivity is a specific property of the element, the changing system must be the chemical atom, and since only one system is involved in the production of a new system and, in addition, heavy charged particles, in radioactive change the chemical atom must suffer disintegration.

The radio-elements possess of all elements the heaviest atomic weight. This is indeed their sole common chemical characteristic. The disintegration of the atom and the expulsion of heavy charged particles of the same order of mass as the hydrogen atom leaves behind a new system lighter than before, and possessing chemical and physical properties quite different from those of the original element. The disintegration process, once started, proceeds from stage to stage with definite measurable velocities in each case. At each stage one or more α "rays" are projected, until the last stages are reached, when the β "ray" or electron is expelled. It seems advisable to possess a special name for these now numerous atom-fragments, or new atoms, which result from the original atom after the ray has been expelled, and which remain in existence only a limited time, continually undergoing further change. Their instability is their chief characteristic. On the one hand, it prevents the quantity accumulating, and in consequence it is hardly likely that they can ever be investigated by the ordinary methods. On the other, the instability and consequent ray-expulsion furnishes the means whereby they can be investigated. We would therefore suggest the term *metabolon* for this purpose.

Thus in the following table the metabolons at present known to result from the disintegration of the three radio-elements have been arranged in order.

Uranium.	Thorium.	Radium.
↓	↓	↓
Uranium X.	Thorium X.	Radium Emanation.
↓	↓	↓
P	Thorium Emanation.	Radium-Excited Activity I.
	↓	↓
	Thorium-Excited Activity I.	ditto II.
	↓	↓
	ditto II.	ditto III.
	↓	↓
	P	P

The three queries represent the three unknown ultimate products. The atoms of the radio-elements themselves form, so to speak, the common ground between metabolons and atoms, possessing the properties of both. Thus, although they are disintegrating, the rate is so slow that sufficient quantity can be accumulated to be investigated chemically. Since the rate of disintegration is probably a million times faster for radium than it is for thorium or uranium, we have an explanation of the excessively minute proportion of radium in the natural minerals. Indeed, every consideration points to the conclusion that the radium atom is also a metabolon in the full sense of having been formed by disintegration of one of the other elements present in the mineral. For example, an estimation of its "life," goes to show that the latter can hardly be more than a few thousand years (see § 7). The point is under experimental investigation by one of us, and a fuller discussion is reserved until later.

There is at present no evidence that a single atom or metabolon ever produces more than one new kind of metabolon at each change, and there are no means at present of finding, for example, either how many metabolons of thorium X, or how many projected particles, or "rays," are produced from each atom of thorium. The simplest plan therefore, since it involves no possibility of serious error if the nature of the convention is understood, is to assume that each atom or metabolon produces one new metabolon or atom and one "ray."

§ 7. *The Energy of Radioactive Change, and the Internal Energy of the Chemical Atom.*

The position of the chemical atom as a very definite stage in the complexity of matter, although not the lowest of which it is now possible to obtain experimental knowledge,

is brought out most clearly by a comparison of the respective energy relations of radioactive and chemical change. It is possible to calculate the order of the quantity of energy radiated from a given quantity of radio-element during its complete change, by several independent methods, the conclusions of which agree very well among themselves. The most direct way is from the energy of the particle projected, and the total number of atoms. For each atom cannot produce less than one "ray" for each change it undergoes, and we therefore arrive in this manner at a minimum estimate of the total energy radiated. On the other hand, one atom of a radio-element, if completely resolved into projected particles, could not produce more than about 200 such particles at most, assuming that the mass of the products is equal to the mass of the atom. This consideration enables us to set a maximum limit to the estimate. The α rays represent so large a proportion of the total energy of radiation that they alone need be considered.

Let m = mass of the projected particle,
 v = the velocity,
 e = charge.

Now for the α ray of radium

$$v = 2.5 \cdot 10^9,$$

$$\frac{e}{m} = 6 \cdot 10^3.$$

The kinetic energy of each particle

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \frac{m}{e} v^2 e = 5 \cdot 10^{14} e.$$

J. J. Thomson has shown that

$$e = 6 \cdot 10^{-10} \text{ E.S. Units} = 2 \cdot 10^{-20} \text{ Electromagnetic Units.}$$

Therefore the kinetic energy of each projected particle = 10^{-5} erg. Taking 10^{20} as the probable number of atoms in one gram of radium, the total energy of the rays from the latter = 10^{15} ergs = $2.4 \cdot 10^7$ gram-calories, on the assumption that each atom projects one ray. Five successive stages in the disintegration are known, and each stage corresponds to the projection of at least one ray. It may therefore be stated that the total energy of radiation during the disintegration of one gram of radium cannot be less than 10^8 gram-calories, and may be between 10^9 and 10^{10} gram-calories. The energy radiated does not necessarily involve the whole of the energy of disintegration and may be only a small part of it. 10^8 gram-calories per gram may therefore be safely accepted as

the least possible estimate of the energy of radioactive change in radium. The union of hydrogen and oxygen liberates approximately $4 \cdot 10^8$ gram-calories per gram of water produced, and this reaction sets free more energy for a given weight than any other chemical change known. The energy of radioactive change must therefore be at least twenty-thousand times, and may be a million times, as great as the energy of any molecular change.

The rate at which this store of energy is radiated, and in consequence the life of a radio-element, can now be considered. The order of the total quantity of energy liberated per second in the form of rays from 1 gram of radium may be calculated from the total number of ions produced and the energy required to produce an ion. In the solid salt a great proportion of the radiation is absorbed in the material, but the difficulty may be to a large extent avoided by determining the number of ions produced by the radiation of the emanation, and the proportionate amount of the total radiation of radium due to the emanation. In this case most of the rays are absorbed in producing ions from the air. It was experimentally found that the maximum current due to the emanation from 1 gram of radium, of activity 1000 compared with uranium, in a large cylinder filled with air, was $1.65 \cdot 10^{-8}$ electromagnetic units. Taking $e = 2 \cdot 10^{-20}$, the number of ions produced per second = $8.2 \cdot 10^{11}$. These ions result from the collision of the projected particles with the gas in their path. Townsend (Phil. Mag. 1901, vol. i.), from experiments on the production of ions by collision, has found that the minimum energy required to produce an ion is 10^{-11} ergs. Taking the activity of pure radium as a million times that of uranium, the total energy radiated per second by the emanation from 1 gram of pure radium = 8200 ergs. In radium compounds in the solid state, this amount is about $\frac{1}{4}$ of the total energy of radiation, which therefore is about

$$2 \cdot 10^4 \text{ ergs per second,}$$

$$6.3 \cdot 10^{11} \text{ ergs per year,}$$

$$15,000 \text{ gram-calories per year.}$$

This again is an under-estimate, for only the energy employed in producing ions has been considered, and this may be only a small fraction of the total energy of the rays.

Since the α radiation of all the radio-elements is extremely similar in character, it appears reasonable to assume that the feebleness of radiations of thorium and uranium are due to these elements disintegrating less rapidly than radium. The energy radiated in these cases is about 10^{-6} that from radium, and

is therefore about 0.15 gram-calorie per year. Dividing this quantity by the total energy of radiation, $2.4 \cdot 10^7$ gram-calories, we obtain the number $6 \cdot 10^{-10}$ as a maximum estimate for the proportionate amount of uranium or thorium undergoing change per year. Hence in one gram of these elements less than a milligram would change in a million years. In the case of radium, however, the same amount must be changing per gram *per year*. The "life" of the radium cannot be in consequence more than a few thousand years on this minimum estimate, based on the assumption that each particle produces one ray at each change. If more are produced the life becomes correspondingly longer, but as a maximum the estimate can hardly be increased more than 50 times. So that it appears certain that the radium present in a mineral has not been in existence as long as the mineral itself, but is being continually produced by radioactive change.

Lastly, the number of "rays" produced per second from 1 gram of a radio-element may be estimated. Since the energy of each "ray" = 10^{-5} ergs = $2.4 \cdot 10^{-13}$ gram-calories, $6 \cdot 10^{10}$ rays are projected every year from 1 gram of uranium. This is approximately 2000 per second. The α radiation of 1 milligram of uranium in one second is probably within the range of detection by the electrical method. The methods of experiment are therefore almost equal to the investigation of a single atom disintegrating, whereas not less than 10^4 atoms of uranium could be detected by the balance.

It has been pointed out that these estimates are concerned with the energy of radiation, and not with the total energy of radioactive change. The latter, in turn, can only be a portion of the internal energy of the atom, for the internal energy of the resulting products remains unknown. All these considerations point to the conclusion that the energy latent in the atom must be enormous compared with that rendered free in ordinary chemical change. Now the radio-elements differ in no way from the other elements in their chemical and physical behaviour. On the one hand they resemble chemically their inactive prototypes in the periodic system very closely, and on the other they possess no common chemical characteristic which could be associated with their radioactivity. Hence there is no reason to assume that this enormous store of energy is possessed by the radio-elements alone. It seems probable that atomic energy in general is of a similar, high order of magnitude, although the absence of change prevents its existence being manifested. The existence of this energy accounts for the stability of the chemical elements as well as for the con-

servation of radioactivity under the influence of the most varied conditions. It must be taken into account in cosmical physics. The maintenance of solar energy, for example, no longer presents any fundamental difficulty if the internal energy of the component elements is considered to be available, *i. e.* if processes of sub-atomic change are going on. It is interesting to note that Sir Norman Lockyer has interpreted the results of his spectroscopic researches on the latter view (*Inorganic Evolution*, 1900) although he regards the temperature as the cause rather than the effect of the process.

McGill University, Montreal.

LXI. Removal of the Voltaic Potential-Difference by Heating in Oil. By J. BROWN, F.R.S.*

IN 1879, at an early stage of my investigations on voltaic action †, it was suggested that the difference of potential observed near the surfaces of dissimilar bodies in contact is due to chemical action of films condensed on their surfaces from the atmosphere or gas surrounding such bodies.

It was pointed out ‡ that such a condition of things is quite analogous to that of an ordinary voltaic cell divided by a non-conductor through its electrolyte, *e. g.*, copper | electrolyte | air | electrolyte | zinc, the copper and zinc being in contact and the difference of potential being taken between the two air | electrolyte surfaces. The film is therefore probably of an electrolytic nature, thus falling in with Faraday's view § that "in considering this oxidation, or other direct action upon the METAL itself as the cause and source of the electric current, it is of the utmost importance to observe that the oxygen or other body must be in a peculiar condition, namely in the state of combination and not only so, but limited still further to such a state of combination and in such proportions as will constitute an *electrolyte*." In 1886 I explained || the important difference between my view and that of De La Rive, which latter included the formation of non-conducting oxide films on the metal surfaces as necessary to maintain the electrification. I showed ¶ experimentally that if the surfaces of the zinc and copper plates, arranged as in Volta's condenser, be nearly true planes and be brought sufficiently close together to allow their films to come in contact, but not the metals

* Communicated by the Author.

† Phil. Mag. vii. p. 111 (1879).

§ Experimental Researches, i. p. 273.

|| Proc. Roy. Soc. lxi. p. 295 (1886).

‡ *Ibid.* p. 110.

¶ *Ibid.* p. 307.

LA TRANSFORMATION RADIOACTIVE

E. RUTHERFORD et F. SODDY, *Phil. Mag.*, S.6, 5, (1903), p. 576.

Traduit de l'anglais par Virginie Emsellem.



SOMMAIRE

- I. Les produits de la transformation radioactive et leur nature matérielle spécifique.
- II. Synchronisme entre la transformation et le rayonnement.
- III. Nature matérielle du rayonnement.
- IV. Loi de la transformation radioactive.
- V. Conservation de la radioactivité.
- VI. Relation entre transformation radioactive et transformation chimique.
- VII. Énergie de la transformation radioactive et énergie interne de l'atome chimique.

§1. Les produits de la transformation radioactive et leur nature matérielle spécifique.

Dans des articles antérieurs, il a été montré que la radioactivité des éléments radium, thorium et uranium est maintenue par la production continue de nouvelles sortes de matière possédant une activité temporaire. Dans certains cas, le nouveau produit présente des différences chimiques nettes avec l'élément qui le produit, et peut être séparé par des procédés chimiques. Des exemples en sont donnés par l'extraction du thorium X du thorium, et de l'uranium X de l'uranium. Dans d'autres cas, les nouveaux produits sont de caractère gazeux, et se séparent donc par le simple processus de diffusion, donnant naissance aux émanations radioactives qui sont produites par des composés du thorium et du radium. Ces émanations peuvent être condensées

à froid puis volatilisées à nouveau ; bien qu'elles ne semblent pas posséder d'affinités chimiques positives, elles sont fréquemment occluses dans les substances qui les produisent lorsque celles-ci sont à l'état solide, et sont libérées par la mise en solution ; elles diffusent rapidement dans l'atmosphère et à travers des milieux poreux, et elles présentent en général le comportement de gaz inertes de poids moléculaire relativement élevé. Dans d'autres cas encore, la nouvelle matière est elle-même non-volatile, mais elle est produite par la transformation ultérieure de l'émanation gazeuse, de sorte que celle-ci agit comme un intermédiaire dans le processus de sa séparation de l'élément radioactif. C'est le cas pour les deux différents types d'activité excitée produite sur des objets au voisinage de composés du thorium et du radium respectivement, qui, à leur tour, possèdent des propriétés matérielles caractéristiques et bien définies. Par exemple, l'activité excitée du thorium se volatilise à une haute température, bien précise, se redépote au voisinage, et peut être dissoute dans certains réactifs mais pas dans d'autres.

Ces différents nouveaux corps se distinguent donc de la matière ordinaire sur seulement un point, qui est que leur quantité est bien inférieure à la limite atteignable par les méthodes ordinaires d'analyse chimique et spectroscopique. Pour présenter un exemple de ce que ceci n'est pas un argument contre leur existence matérielle spécifique, on peut mentionner le fait que c'est encore vrai pour le radium lui-même sous sa forme native. Aucun test chimique ou spectroscopique n'est assez précis pour détecter le radium dans la pechblende, et il faut augmenter de nombreuses fois la quantité présente par concentration pour commencer à voir apparaître le spectre caractéristique. Mme Curie, ainsi que Giesel, ont réussi à obtenir des quantités tout à fait considérables de composés du radium purs en travaillant plusieurs tonnes de pechblende, et les résultats tendent à prouver que le radium est en réalité un des éléments chimiques les mieux définis et les plus caractéristiques. Ainsi, les divers nouveaux corps dont l'existence a été découverte grâce à leur radioactivité pourraient sans aucun doute, comme le radium, être amenés dans la gamme de détection des méthodes plus anciennes s'il était possible d'accroître indéfiniment la quantité de matériau employé.

§2. Synchronisme entre la transformation et le rayonnement.

Il reste à considérer dans le présent article la nature des transformations qui produisent ces nouveaux corps. Les preuves expérimentales accumulées sont maintenant suffisamment complètes pour permettre d'établir, avec un degré considérable de certitude et de précision, une théorie générale de la nature

du processus. Il est rapidement apparu à partir de ces preuves qu'il existe une relation bien plus intime, entre la radioactivité et les transformations qui la maintiennent, que ce qu'exprime l'idée de production de matière active. Il faut rappeler que tous les cas de transformation radioactive qui ont été étudiés peuvent se résumer à la production d'une substance par une autre (en faisant abstraction pour l'instant des rayons émis). Lorsque plusieurs transformations ont lieu ensemble, elles ne sont pas simultanées mais successives. Ainsi, le thorium produit le thorium X, le thorium X produit l'émanation de thorium, et cette dernière produit l'activité excitée. Mais on peut montrer que la radioactivité de chacune de ces substances est liée, non pas à la transformation par laquelle elle a été elle-même produite, mais à la transformation au cours de laquelle elle produit à son tour le nouveau type suivant. Ainsi, après que le thorium X a été séparé du thorium qui le produit, le rayonnement du thorium X est proportionnel à la quantité d'émanation qu'il produit, et à la fois la radioactivité et le pouvoir d'émanation du thorium X décroissent suivant la même loi *et au même taux*. Au cours de l'étape suivante, l'émanation continue à produire l'activité excitée. L'activité de l'émanation diminue de moitié en une minute, et la quantité d'activité excitée qu'elle produit sur l'électrode négative dans un champ électrique diminue dans le même rapport. Ces résultats sont totalement confirmés dans le cas du radium. L'activité de l'émanation de radium diminue de moitié en quatre jours, de même que son pouvoir de production de l'activité excitée.

Il n'est donc pas possible de considérer la radioactivité comme une *conséquence* de transformations qui ont déjà eu lieu. Les rayons émis doivent *accompagner* la transformation du système qui rayonne en celui qui le suit.

Activité non séparable. — Ce point de vue rend compte d'un seul coup de l'existence d'une radioactivité constante, non séparable par des procédés chimiques, dans chacun des trois radioéléments. Cette activité non séparable est constituée du rayonnement qui accompagne la transformation primaire du radioélément lui-même en premier nouveau corps qui est produit. Ainsi, dans le thorium, environ 25 pour cent du rayonnement α accompagne la première transformation du thorium en thorium X. Dans l'uranium, la totalité du rayonnement α est non séparable et accompagne la transformation de l'uranium en uranium X.

Plusieurs conséquences importantes découlent de la conclusion que le rayonnement accompagne la transformation. Un corps qui est radioactif doit *ipso facto* être en cours de transformation, et il n'est donc pas possible

que l'un des nouveaux types de matière radioactive – par exemple l'uranium X, le thorium X, les deux émanations, &c. – puisse être identique à l'un quelconque des éléments connus. Car ils n'existent que pendant un temps court, et la décroissance de leur radioactivité est l'expression du fait que leur quantité diminue continuellement. D'un autre côté, puisque les produits ultimes des transformations ne peuvent pas être radioactifs, il doit toujours exister au moins une étape dans le processus qui soit au-delà de la gamme accessible des méthodes expérimentales. Pour cette raison, les produits ultimes qui résultent des transformations restent inconnus, les quantités mises en jeu étant indistingables, excepté par les méthodes de radioactivité. Dans les minéraux sous forme naturelle contenant les radioéléments, ces transformations doivent avoir eu lieu continuellement pendant de très longues périodes et, à moins qu'ils réussissent à s'échapper, les produits ultimes devraient s'être accumulés en quantité suffisante pour être détectés, et devraient donc apparaître dans la nature comme les compagnons invariables des radioéléments. Nous avons déjà suggéré, pour ces raisons et d'autres encore, que l'hélium pourrait être un tel produit ultime bien que, évidemment, cette suggestion soit pour l'instant purement spéculative. Mais une étude approfondie des minéraux radioactifs apporterait selon toute probabilité une preuve supplémentaire concernant cette question importante.

§3. Nature matérielle du rayonnement.

Le point de vue selon lequel le ou les rayons émis par un système sont produits au moment où le système se transforme a été confirmé avec force par la découverte de la faculté des rayons α à être déviés électriquement et magnétiquement. La déviation se produit dans le sens opposé aux rayons β ou cathodiques, et les rayons sont donc constitués de corps chargés positivement projetés à grande vitesse (Rutherford, *Phil. Mag.*, fév. 1903). Il a été démontré que celle-ci est de l'ordre de $2,5 \cdot 10^9$ cm par seconde. La valeur de e/m , rapport de la charge du porteur à sa masse, est de l'ordre de $6 \cdot 10^3$. Mais la valeur de e/m pour les rayons cathodiques est d'environ 10^7 . Supposant que la valeur de la charge est la même dans chaque cas, la masse apparente de la particule positive projetée est plus de 1000 fois plus élevée que pour les rayons cathodiques. Or $e/m = 10^4$ pour l'atome d'hydrogène lors de l'électrolyse de l'eau. La particule qui constitue les rayons α se comporte donc comme si sa masse était du même ordre que celle de l'atome d'hydrogène. Les rayons α de tous les radioéléments, et de tous les différents corps radioactifs qu'ils produisent, possèdent des propriétés analogues et ne

différent que dans une faible mesure en pouvoir de pénétration. Il y a donc de fortes raisons de croire que les rayons α en général sont des projections et que la masse de la particule est du même ordre que celle de l'atome d'hydrogène, très grande devant la masse de la particule projetée qui constitue le rayon β ou rayon facilement déviable du même élément.

En ce qui concerne le rôle que jouent dans la radioactivité les deux types de rayonnement, il ne peut y avoir aucun doute sur le fait que les rayons α sont de loin les plus importants. Dans tous les cas, ils représentent plus de 99 pour cent de l'énergie rayonnée*, et bien que les rayons β , en raison de leur pouvoir de pénétration et de leur action photographique marquée, aient été plus souvent étudiés, ils sont en comparaison de moindre importance.

Il a été démontré que l'activité non séparable des trois radioéléments, l'activité des deux émanations, et la première étape de l'activité excitée du radium ne sont composées que de rayons α . Ce n'est que près de la fin des processus, dans la mesure où leur progression peut être suivie expérimentalement, que les rayons β ou cathodiques font leur apparition†.

À la lumière de ces preuves, il y a toute raison de supposer non seulement que l'expulsion d'une particule chargée accompagne la transformation, mais que cette expulsion *est* en fait la transformation.

§4. Loi de la transformation radioactive.

L'idée selon laquelle le rayonnement issu d'une substance active accompagne sa transformation donne un sens physique très précis à la loi de décroissance de la radioactivité. Dans tous les cas où l'un des produits radioactifs a été séparé et son activité examinée indépendamment de la substance active qui lui donne naissance ou de celle qu'il produit à son tour, on a découvert que l'activité, dans toutes les conditions étudiées, décroît avec le temps selon une progression géométrique. Ceci est exprimé par l'équation

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-\lambda t}$$

où I_0 est le courant d'ionisation initial dû aux rayonnements, I_t celui au

* Dans l'article où ce point est démontré (*Phil. Mag.* sept. 1902, p. 329), il y a une évidente erreur de calcul. Le nombre devrait être 100 au lieu de 1000.

† En plus des rayons α et β , les radioéléments produisent aussi un troisième type de rayonnement qui est extrêmement pénétrant. Le thorium comme le radium (Rutherford, *Phys. Zeit.* 1902) produit ces rayons pénétrants, et il a depuis été découvert que l'uranium possède la même propriété. Ces rayons n'ont pas encore été suffisamment examinés pour rendre possible une quelconque discussion sur le rôle qu'ils jouent dans les processus radioactifs.

temps t et λ est une constante. Chaque rayon ou particule projetée produira en général un certain nombre d'ions sur sa trajectoire, et le courant d'ionisation est donc proportionnel au nombre de ces particules projetées par seconde. Ainsi

$$\frac{n_t}{n_0} = e^{-\lambda t},$$

où n_t est le nombre de particules projetées par unité de temps au temps t et n_0 le nombre initial.

Si chaque système qui se transforme donne naissance à un rayon, le nombre de systèmes N_t qui restent inchangés au temps t est donné par

$$N_t = \int_t^{\infty} n_t \cdot dt = \frac{n_0}{\lambda} e^{-\lambda t}.$$

Le nombre N_0 initialement présent est obtenu en faisant $t = 0$.

$$N_0 = \frac{n_0}{\lambda}$$

et

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}.$$

La même loi reste valable si chaque système qui se transforme produit deux rayons, ou tout autre nombre bien défini.

En différenciant,

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_t,$$

c'est-à-dire que le taux de transformation du système est à tout instant proportionnel à la quantité qui n'a pas encore été transformée.

La loi des transformations radioactives peut donc s'exprimer en un unique énoncé : la proportion de matière radioactive qui se transforme par unité de temps est une constante. Lorsque la quantité totale ne varie pas (condition presque remplie au point d'équilibre où le taux de production est égal au taux de transformation), la proportion de la totalité qui se transforme par unité de temps est représentée par la constante λ , qui possède une valeur fixée et caractéristique pour chaque type de matière active. On peut donc avec pertinence appeler λ la « constante radioactive ». La complexité du phénomène de radioactivité est due à l'existence, en général, de différents types de matière se transformant simultanément l'un en l'autre, chaque type possédant une constante radioactive différente.

§5. Conservation de la radioactivité.

La loi des transformations radioactives qui a été présentée est valable pour toutes les étapes qui ont été examinées, et donc pour le phénomène en général. La constante radioactive λ a été étudiée dans des conditions très variées de températures, et sous l'influence des agents physiques et chimiques les plus puissants, et il n'a été observé aucune modification de sa valeur. La loi constitue en fait l'expression mathématique d'un principe général auquel nous avons été conduits par l'ensemble de nos études. Au vu de notre connaissance actuelle, la radioactivité doit être considérée comme le résultat d'un processus qui réside entièrement hors de la sphère des forces contrôlables connues, et ne peut être ni créée, ni altérée, ni détruite.

[...]

La preuve générale sur laquelle est fondé ce principe englobe la totalité du champ de la radioactivité. Les expériences de Becquerel et Curie ont montré que les rayonnements issus respectivement de l'uranium et du radium restent constants sur de grands intervalles de temps. Mme Curie a mis en avant l'idée que la radioactivité était une propriété spécifique de l'élément en question, et la réussite de la séparation de l'élément radium de la pechblende fut un résultat direct de cette façon de considérer cette propriété. La possibilité de séparer d'un radioélément un constituant fortement actif, bien qu'à première vue contradictoire, n'est rien d'autre, après un examen attentif, qu'une confirmation de cette idée. Dans tous les cas, seule une partie de cette activité est retirée, et cette partie est récupérée spontanément par le radioélément au cours du temps. Il n'y a plus aucun doute sur l'affirmation originale de Mme Curie, selon laquelle la radioactivité est une propriété spécifique de l'élément.

[...]

S'il existe des éléments plus lourds que l'uranium, il est probable qu'ils seront radioactifs. L'extrême sensibilité de la radioactivité en tant que moyen d'analyse chimique permettrait la reconnaissance de tels éléments, même s'ils étaient présents en quantité infinitésimale. Il faut donc s'attendre à ce que le nombre de radioéléments augmente à l'avenir, bien plus que les trois qui sont connus à l'heure actuelle qui doivent exister en quantité infime. Dans la première étape de la recherche de tels éléments, une étude purement chimique est de peu d'utilité. Les critères principaux sont la permanence des rayonnements, leur caractère distinctif, et l'existence ou l'absence d'émanations caractéristiques d'autres produits de désintégration.

§6. Relation entre transformation radioactive et transformation chimique.

La loi de la transformation radioactive, selon laquelle le taux de transformation est proportionnel à la quantité de substance subissant la transformation, est aussi la loi des réactions chimiques monomoléculaires. La transformation radioactive doit donc être telle qu'elle implique un seul système, car s'il s'y déroulait une combinaison, où interviendrait l'action mutuelle de deux systèmes, le taux de transformation dépendrait de la concentration, et la loi ferait intervenir un facteur de volume. Ce n'est pas le cas. Puisque la radioactivité est une propriété spécifique de l'élément, le système subissant la transformation doit être l'atome chimique, et puisqu'un seul système est impliqué dans la production d'un nouveau système ainsi que de particules lourdes et chargées, alors, dans la transformation radioactive, l'atome chimique doit subir une désintégration.

Parmi tous les éléments, les radioéléments sont ceux qui possèdent le poids atomique le plus élevé. C'est de fait leur unique caractéristique chimique commune. La désintégration de l'atome et l'expulsion de particules lourdes et chargées, dont la masse est du même ordre que celle de l'atome d'hydrogène, conduit à un nouveau système, plus léger, dont les propriétés physiques et chimiques sont totalement différentes de celles de l'élément originel. Le processus de désintégration, une fois entamé, procède par étapes de vitesses précisément mesurables dans chaque cas. À chaque étape, un ou plusieurs « rayons » α sont projetés, jusqu'à ce que soient atteintes les étapes finales, lorsque le « rayon » β ou électron est expulsé. Il serait utile de posséder un nom particulier pour ces fragments d'atomes, ou nouveaux atomes, qui sont maintenant nombreux et proviennent de l'atome originel après expulsion des rayons, et qui n'existent que pendant un temps limité, subissant sans cesse de nouvelles transformations. Leur instabilité est leur principale caractéristique. D'un côté, elle empêche leur accumulation, et il est par conséquent très peu probable qu'ils soient jamais étudiés par des méthodes ordinaires. De l'autre, l'instabilité et l'expulsion de rayons qui en résulte fournit les moyens par lesquels ils pourront être étudiés. Nous suggérons donc à cet effet le terme de *métabolon*. Nous avons donc disposé en ordre dans le tableau suivant les métabolons dont on sait actuellement qu'ils résultent de la désintégration des trois radioéléments.

Uranium	Thorium	Radium
↓	↓	↓
Uranium X	Thorium X	Émanation du radium
↓	↓	↓
?	Émanation du thorium	Activité excitée du radium I.
	↓	↓
	Activité excitée du thorium I.	<i>idem</i> II.
	↓	↓
	<i>idem</i> II.	<i>idem</i> III.
	↓	↓
	?	?

Les trois points d'interrogation représentent les trois produits ultimes inconnus. Les atomes des radioéléments eux-mêmes forment pour ainsi dire le fondement commun entre les métabolons et les atomes, et en possèdent les propriétés. Ainsi, même au cours de leur désintégration, leur taux de variation est si lent qu'une quantité suffisante peut être accumulée pour permettre une étude chimique. Puisque le taux de désintégration est probablement un million de fois plus rapide pour le radium que pour le thorium ou l'uranium, nous avons une explication de la proportion si infime de radium dans les minéraux naturels. De fait, tout porte à croire que l'atome de radium est aussi un métabolon dans la mesure où il aurait été formé par la désintégration de l'un des autres éléments présents dans le minéral. Par exemple, une estimation de sa durée de « vie » tend à montrer que celle-ci peut être à peine plus de quelques milliers d'années (voir § 7). Ce point est en cours d'étude expérimentale par l'un d'entre nous, et une discussion plus complète est réservée pour plus tard.

Il n'y a pour l'instant aucune preuve qu'un seul atome ou métabolon puisse produire plus d'une nouvelle sorte de métabolon à chaque transformation, et il n'y a pour l'instant aucun moyen de découvrir, par exemple, combien de métabolons de thorium X, ou bien combien de particules projetées ou « rayons » sont produits à partir de chaque atome de thorium. L'idée la plus simple, puisqu'elle n'implique aucune possibilité d'erreur grave si la nature de la convention est comprise, est donc de supposer que chaque atome ou métabolon produit un nouveau métabolon ou un nouvel atome et un « rayon ».

§7. *Énergie de la transformation radioactive et énergie interne de l'atome chimique.*

La position de l'atome chimique en tant qu'échelon précis dans la complexité de la matière, bien qu'il ne soit pas le plus bas dont on peut actuellement avoir une connaissance expérimentale, apparaît plus clairement en comparant les relations énergétiques respectives des transformations radioactives et chimiques. En utilisant plusieurs méthodes indépendantes et dont les conclusions s'accordent parfaitement, il est possible de calculer l'ordre de grandeur de l'énergie rayonnée par une quantité donnée de radioélément au cours de sa transformation complète.

[...]

L'énergie d'une transformation radioactive doit donc être au moins vingt mille fois, et peut-être un million de fois, plus grande que l'énergie de n'importe quelle transformation moléculaire.

[...]

En admettant que l'activité du radium pur est un million de fois celle de l'uranium, l'énergie totale rayonnée par seconde par l'émanation d'un gramme de radium pur = 8200 ergs*. Dans les composés du radium à l'état solide, cela constitue environ 0,4 fois l'énergie totale du rayonnement, qui est donc à peu près

2 10^4 ergs par seconde,

6,3 10^{11} ergs par an,

15 000 grammes-calories par an.

Encore une fois, ceci est une sous-estimation, car seule l'énergie utilisée pour la production des ions a été considérée, et ceci pourrait n'être qu'une faible fraction de l'énergie totale des rayons.

En raison de la forte similitude de caractère du rayonnement α de tous les radioéléments, il semble raisonnable de supposer que les rayonnements plus faibles du thorium et de l'uranium sont dus au fait que ces éléments se désintègrent moins rapidement que le radium. L'énergie rayonnée dans ces cas est environ 10^{-6} fois celle du radium, et elle vaut donc à peu près 0,015 gramme-calorie par an. En divisant cette quantité par l'énergie totale du rayonnement, $2,4 \cdot 10^7$ grammes-calories, nous obtenons $6 \cdot 10^{-10}$ pour l'estimation maximale de la proportion d'uranium ou de thorium subissant

* On utilisait autrefois comme unité de travail l'erg (du grec « travail ») qui valait 10^{-7} joule. (NdA)

une transformation par an. Dans un gramme de ces éléments, moins d'un milligramme se transformerait en un million d'années. Dans le cas du radium, cependant, la même quantité doit s'être transformée par gramme *et par an*. La « vie » du radium ne peut par conséquent être de plus de quelques milliers d'années avec cette estimation minimale, basée sur l'hypothèse que chaque particule produit un rayon à chaque changement. Si elle en produit plus, la vie s'allonge en proportion, mais l'estimation peut, au maximum, être à peine augmentée plus de 50 fois. Il apparaît ainsi comme certain que le radium présent dans un minéral n'a pas eu une existence aussi longue que le minéral lui-même, mais est continuellement produit par transformation radioactive.

Enfin, on peut estimer le nombre de « rayons » produits par seconde par 1 gramme de radioélément. Puisque l'énergie de chaque « rayon » = 10^{-5} ergs = $2,4 \cdot 10^{-13}$ gramme-calorie, $6 \cdot 10^{10}$ rayons sont projetés par an par 1 gramme d'uranium. Cela fait approximativement 2000 par seconde. Le rayonnement α d'1 milligramme d'uranium en une seconde est probablement compris dans la gamme détectable par la méthode électrique. Les méthodes expérimentales se valent donc à peu près toutes en ce qui concerne l'étude d'un unique atome qui se désintègre, alors que la balance ne peut pas détecter moins de 10^4 atomes d'uranium.

On a fait remarquer que ces estimations concernent l'énergie de rayonnement, et pas l'énergie totale de la transformation radioactive. Celle-ci, de son côté, ne peut constituer qu'une portion de l'énergie interne de l'atome, car l'énergie interne des produits résultants reste inconnue. Toutes ces considérations conduisent à la conclusion que l'énergie latente dans l'atome doit être énorme en comparaison de celle qui est libérée dans les transformations chimiques ordinaires. Cependant, les radioéléments ne diffèrent en aucune manière des autres éléments dans leur comportement chimique et physique. D'un côté, ils ressemblent chimiquement de très près à leurs prototypes inactifs dans la classification périodique, et de l'autre ils ne possèdent aucune caractéristique chimique commune qui pourrait être associée à leur radioactivité. Il n'y a donc aucune raison de supposer que seuls les radioéléments possèdent cet énorme stock d'énergie. Il semble probable que l'énergie atomique en général est du même ordre de grandeur, très grand, bien que l'absence de transformation empêche la manifestation de son existence. L'existence de cette énergie rend compte de la stabilité des éléments chimiques, ainsi que de la conservation de la radioactivité sous l'influence des conditions les plus variées. Elle doit être prise en compte en

physique cosmique. L'entretien de l'énergie solaire, par exemple, ne présente plus aucune difficulté fondamentale si l'énergie interne de ses constituants est considérée comme disponible, c'est-à-dire s'il se produit des processus de transformation subatomique. Il est intéressant de noter que Sir Norman Lockyer a interprété les résultats de ses recherches spectroscopiques de ce point de vue (*Inorganic Evolution*, 1900) bien qu'il considère la température comme la cause plutôt que comme l'effet du processus.

Université McGill, Montréal.